

Konsta Mäkelä

# LÄMPÖPUTKIEN KÄYTTÖ ELEKTRONIIKAN JÄÄHDYTYKSESSÄ

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Kesäkuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Konsta Mäkelä: Lämpöputkien käyttö elektroniikan jäähdytyksessä  
Tampereen yliopisto  
Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma  
Kandidaatintyö  
Kesäkuu 2019

---

Elektroniset komponentit pienenevät huomattavaa vauhtia, mikä asettaa haasteita jäähdytyksen toteuttamiselle. Kuumenevat komponentit voivat tuhoutua ja rikkoa samalla muita laitteessa käytettäviä osia. Nykyisillä menetelmillä ei pystytä vastaamaan pienenevän elektroniikan asettamiin haasteisiin.

Ongelmaan on monia lupaavia ratkaisuja, joista yksi on lämpöputkien käyttö. Tässä työssä on tarkoitus perehtyä lämpöputkien käytön mahdollisuuksiin painottuen pienelektroniikkaan. Etuja lämpöputkilla on monia, joista merkittävimmät ovat toimintavarmuus, tehokkuus, muokattavuus ja ennen kaikkea pieni koko. Haasteet liittyvät puolestaan esimerkiksi kapillaariseen paineeseen ja nesteen kulkeutumiseen höyryn mukana, jotka voivat aiheuttaa lämpöputken kuivumisen.

Erilaisia lämpöputkia on paljon, mutta vain yleisimmät ja lupaavimmat tyypit käydään tässä työssä läpi. Jokaisella lämpöputkityypillä on etunsa ja sovelluskohteensa, joten komponenttien jäähdytys voidaan suunnitella ja toteuttaa hyvinkin tehokkaasti ja luotettavasti. Lisäksi lämpöputket voidaan täyttää erilaisilla työnesteillä eri käyttötarkoituksia varten, minkä ansiosta toimintaolosuhteisiin pystytään sopeutumaan entistä paremmin.

Lämpöputkien käyttö voidaan suunnitella ja optimoida huolellisesti vastaamaan jäähdytyksen tarpeita, joten muokattavuus on myös merkittävä etu. Taustalle vaaditaan kuitenkin huomattava määrä tutkimustyötä, joka aiheuttaa luonnollisesti lisäkustannuksia. Myös oskilloivien lämpöputkien toiminnan aukoton selittäminen vaatii lisää tutkimusta. Tutkimusta tehdään varsinkin uusien materiaalien ja valmistusmenetelmien parissa, jotka todennäköisesti mahdollistavat luoda entistä pienempiä ja tehokkaampia lämpöputkia. Tulevaisuuden näkymät lämpöputkien kannalta ovat siis hyvät.

Avainsanat: Lämpöputki, elektroniikka, jäähdytys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. LÄMPÖPUTKEN RAKENNE JA TOIMINTA.....	2
3. LÄMPÖPUTKIEN TYYPIT .....	5
3.1 Silmukkalämpöputket .....	5
3.2 Pienikokoiset lämpöputket.....	6
3.3 Litteät lämpöputket ja höyrykammiot .....	7
3.4 Oskilloivat lämpöputket .....	7
4. SOVELLUSKOHTEET ELEKTRONIIKAN JÄÄHDYTYKSESSÄ .....	9
4.1 Lämpöputki osana jäähdytysratkaisua .....	9
4.2 Lämpöputken suunnittelu- ja valmistusprosessi .....	11
5. HYÖDYT JA HAASTEET .....	16
5.1 Hyödyt ja edut.....	16
5.2 Haasteet ja rajoitukset.....	17
6. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT JA TUTKIMUS.....	20
7. YHTEENVETO.....	22
LÄHTEET .....	23

# 1. JOHDANTO

Käyttämämme elektroniikka kehitty huimaa vauhtia. Elektroniikassa käytettävien komponenttien teho kasvaa nopeasti, minkä lisäksi komponenttien koko pienenee entisestään. Toisin sanoen laitteiden tehotiheydet ja lämpövuot ovat merkittävässä kasvussa, mikä aiheuttaa haasteita jäähdytyksen toteuttamiselle. Ongelmana on siis saada lämpövuon suuruus tarvittavan pienelle tasolle, jottei komponenttien elinikä tai toimintakyky heikkene. Pahimmassa tapauksessa suuri lämpötila ja lämpövuoto voivat rikkoa komponentin kokonaan. [1] Yksi mahdollinen sovelluskohde lämpöputkille onkin puhelin, joka vaikuttaisi olevan varsin välttämätön esine tänä päivänä [2].

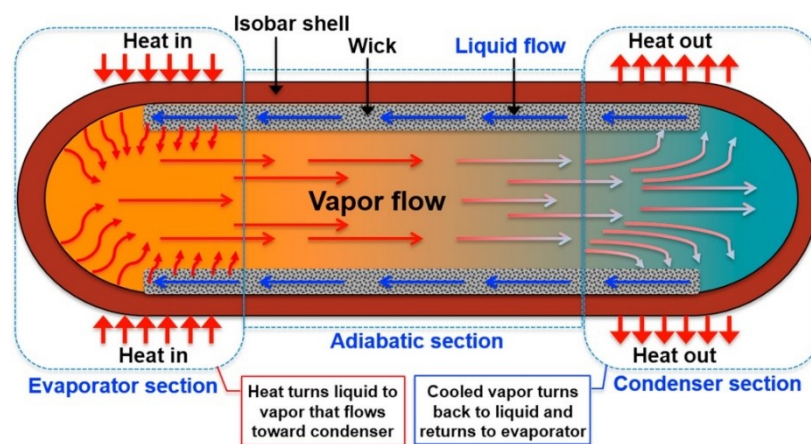
Nykyiset jäähdytysmenetelmät eivät kykene vastaamaan edellä mainittuihin vaatimuksiin, joten uusia ratkaisuja tarvitaan, ja niitä on myös etsitty. Yksi mahdollinen tutkimuskohteena oleva ratkaisu ongelmaan on lämpöputket tai mikrokokoiset lämpöputket. Niille on ominaista hyvin suuri efektiivinen lämmönjohtavuus verrattuna esimerkiksi tavanomaiseen kupariin, mikä mahdollistaisi tehokkaan lämmönsiirtämisen pois kuumenevilta alueilta. [1]

Lämpöputkien tehtävänä olisi siis poistaa lämpöä yhtä nopeasti tai nopeammin kuin sitä syntyy jäähdytettävässä kohteessa. Tulisi myös pohtia niiden soveltuvuutta ja merkitystä osana jäähdytysratkaisua. Käytännössä tämä voisi tarkoittaa esimerkiksi lämpöputkien, rivaston ja prosessorin yhteensovittamista.

Tässä työssä perehdytään lämpöputkien käyttömahdollisuuksiin elektroniikan jäähdytyksessä. Ensimmäisenä tarkastellaan tavanomaisen lämpöputken rakenne sekä toiminta, minkä jälkeen tutkitaan hieman erikoisempia lämpöputkia sekä niiden eroavaisuuksia. Toiseksi pohditaan hieman lämpöputken mahdollisuuksia osana jäähdytysratkaisua ja tutkitaan lämpöputkien suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä. Viimeisenä pohditaan hyötyjä ja rajoitteita sekä luodaan katsaus tulevaisuuden näkymiin ja aiheeseen liittyviin tutkimusongelmiin.

## 2. LÄMPÖPUTKEN RAKENNE JA TOIMINTA

Tavanomainen lämpöputki on rakenteeltaan hyvin yksinkertainen. Lämpöputkessa on 3 pääkomponenttia, jotka ovat höyrystin, lauhdutin ja adiabaattinen osa. Komponentteja ympäröi putkimainen vaippa, jonka sisälle on imetty tyhjiö. Putken sisäpintaan on kiinnitetty kapillaarinen rakenne, joka on huokoinen ja esimerkiksi kuparista valmistettu. Lisäksi putkeen laitetaan jotakin työfluidia, joka voi olla esimerkiksi vettä. [1,3] Kuvassa 1 on esitetty lämpöputken toimintaperiaate.



**Kuva 1.** Lämpöputken toimintaperiaate [1].

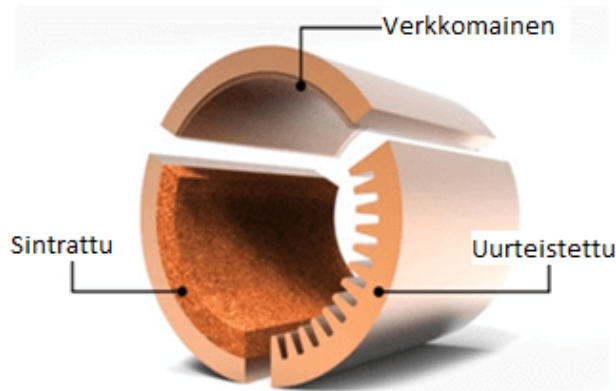
Lämpöputken toiminta perustuu suljettuun kaksifaasikiertoon. Kierto alkaa höyrystimestä, jossa työaineeseen siirtyy jäähdytettävästä kohteesta lämpöä. Siirtyvän lämmön määrä on yhtä suuri kuin työaineen höyrystymiseen vaadittava lämpömäärä, minkä takia työaine höyrystyy, jolloin syntyy paine-ero höyrystimen sekä lauhduttimen välille. Höyry siirtyy adiabaattiseen osaan, jossa se ei siis luovuta lämpöä liikkuaan lauhduttimeen. Vasta lauhduttimeen päästyään työaine luovuttaa lämpöä ympäristöön lauhtuen samalla nesteeksi. Lauhtunut neste siirtyy kapillaariseen rakenteeseen, josta se siirtyy takaisin höyrystimeen kapillaaristen voimien takia – toimintaperiaatteella on siis yhtäläisyyksiä myrskylyhdyssä käytettävän sydänlangan kanssa. [3]

Kapillaarinen rakenne on yksi lämpöputken tärkeimmistä osista, koska se mahdollistaa työaineen suljetun kierron vaipan sisällä, minkä lisäksi se jakaa nesteen tasaisesti höyrystimelle [3]. Toisin sanoen rakenteen ansiosta syntyy tarvittavan suuri kapillaarivoima, jonka ansiosta lämpöputki voi toimia erilaisissa asennoissa gravitaatiokentässä tietyin

rajoituksin [1]. Luvussa 3 kerrotaan kapillaarisen rakenteen tehtäviä erityyppisissä lämpöputkissa, minkä lisäksi luvussa 5 puolestaan esitellään merkittävimpiä rajoituksia lämpöputken toiminnassa.

Tyypillisimmät kapillaariset rakennetyypit ovat uurteinen, sintrattu ja verkkomainen rakenne, jotka ovat esitettyinä kuvassa 2. Uurteisessa rakenteessa on pieniä kanavia, joita pitkin neste pääsee liikkumaan lauhduttimesta takaisin höyrystimeen, minkä lisäksi uurteet toimivat eräänlaisena sisäisinä ripoina tehostaen höyrystimen ja lauhduttimen toimintaa. Uurteisen rakenteen omaavan lämpöputken tehokkuus on huomattavasti verrattuna kahteen muuhun yleisimmin käytettyyn rakenteeseen. Tämän takia lauhdutin tulisi sijoittaa höyrystimen yläpuolelle, jolloin painovoima liikuttaa nestettä lauhduttimesta höyrystimeen. [4]

Sintrattu rakenne on kaikista yleisin, koska se on monikäyttöisin toimittaessa esimerkiksi painovoimaa vastaan. Tämän mahdollistaa hyvin huokoinen rakenne. Verkkomainen rakenne on puolestaan hyvä vaihtoehto ohuille lämpöputkille, mutta rakenteen takia myös kapillaarivoimat ovat heikommalla tasolla kuin sintratussa rakenteessa. [4]



**Kuva 2.** Tyypillisimmät kapillaariset rakenteet. Muokattu lähteestä [4].

Kapillaarisessa rakenteessa kiertävä fluidi voi olla yksinkertaisimmillaan vettä, mutta aineen valinta riippuu kuitenkin muun muassa toimintaolosuhteista. Esimerkiksi lämpötilan laskiessa 100 K:n alapuolelle, eli kryogeenisissä olosuhteissa, voidaan työnesteenä käyttää muun muassa heliumia. Olennaista on kuitenkin se, että käytettävä neste pystyy pitämään kapillaarirakenteen kosteana ja se sopii yhteen muiden lämpöputkessa käytettyjen materiaalien kanssa. [5]

Lämpöputken vaipan materiaali on yleensä metallia, metalliseosta, lasia tai keraamista materiaalia [4,6]. Materiaalin on kuitenkin oltava ominaisuuksiltaan sellainen, ettei se heikennä fluidin tai kapillaarisen rakenteen ominaisuuksia. Ongelmia syntyy myös, jos vaippa ei kestä paineen ja lämpötilan aiheuttamia rasituksia tai jos korroosio heikentää vaipan rakennetta. Lisäksi vaipan ja kapillaarirakenteen täytyy olla helposti muokattavissa, millä lähinnä tarkoitetaan sen taivuttamista haluttuun muotoon. [5]

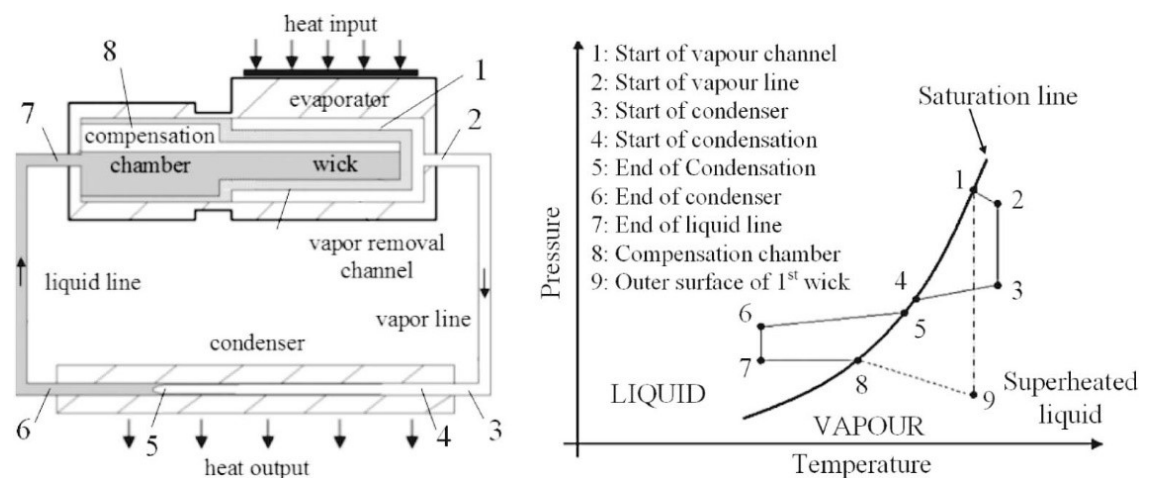
### 3. LÄMPÖPUTKIEN TYYPIT

Vaikka tavanomaiset lämpöputket vaikuttavat toimivan hyvin, niillä on myös puutteita. Tässä luvussa käydään läpi erilaisia lämpöputkia, joita voidaan hyödyntää elektroniikan jäähdytyksessä. Kaikkien niiden toiminta nojautuu luvun 2 mukaisesti kaksifaasikiertoon, mutta ne eroavat tavanomaisesta lämpöputkesta komponenteiltaan. Lisäksi työnesteiden kierto on hieman monivaiheisempi. Erilaisilla rakenteilla pystytään kuitenkin optimoimaan lämpöputken toimintaa sovelluskohteelle suotuisammaksi.

#### 3.1 Silmukkalämpöputket

Yksi lupaavimmista ja tutkituimmista lämpöputken tyypeistä on silmukkalämpöputki, joka tunnetaan paremmin nimellä loop heat pipe (LHP). Rakenteellisesti se eroaa tavanomaisesta lämpöputkesta siten, että siinä on höyrystin ja lauhdutin erillään, ja niitä yhdistää sileäpintainen putki, minkä takia virtaus on kitkattomampaa. Lisäksi höyry ja neste eivät kulje samassa putkessa, minkä takia niiden virtausta ei häiritse myöskään faasien välinen kitka, joten LHP:n toiminta on tehokkaampaa kuin tavanomaisen lämpöputken. [6, 7]

Kuten kuvasta 3 voidaan nähdä, myös kapillaarinen rakenne eroaa tavanomaisesta lämpöputkesta: LHP:ssä kapillaarinen rakenne (kuvassa wick) ei ole suoraan yhteydessä lauhduttimeen. Sen sijaan kapillaarinen rakenne saa tarvittavan nesteen korvauskammista (engl. Compensation Chamber), joka on myös siten putken isoin komponentti. Korvauskammion tehtävät ovat siis varastoida ylimääräinen neste ja huolehtia kapillaarisen rakenteen riittävästä kosteudesta. [6, 7]



**Kuva 3.** LHP:n rakenne ja toiminta [7]



Primäärinen kapillaarirakenne koostuu hienojakoisista huokosista mahdollistaakseen fluidin kierron prosessissa, ja se on samalla yhteydessä lauhduttimeen. Primäärisellä ja sekundäärisellä kapillaarirakenteella on fyysinen yhteys, jonka ansiosta primäärinen rakenne pystyy imemään nestettä sekundäärisestä rakenteesta. Tämän mahdollistaa huokosten eri koko, sillä primäärisessä rakenteessa huokokset ovat pienempiä kuin sekundäärisessä rakenteessa. [7]

Lämmön siirtyessä höyrystimeen sen paine ja lämpötila kasvaa suuremmaksi kuin korvauskammiossa. Normaalisti lämpöä ja nestettä voisi siis siirtyä myös korvauskammioon, mutta kapillaarirakenne toimiikin nyt myös termisenä ja hydraulisenä lukkona: kyläinen kapillaarirakenne ei päästä kuumempaa höyryä virtaamaan väärään suuntaan. [7]

Höyrystimessä nesteeseen siirtyy lämpömäärä  $Q$ , joka on siis höyrystymiseen vaadittavan lämmön  $Q_h$  ja niin kutsutun vuotolämmön  $Q_v$  summa. Vuotolämmöllä on tapana johduttaa osittain kapillaarirakenteen läpi lämmittäen korvauskammiota. Pääasiassa lämpö kuitenkin kuluu nesteen höyrystymiseen ja siirtyy lauhduttimeen luovuttaen lämpömäärän  $Q_l$ , minkä seurauksena höyry lauhtuu samalla tavalla kuin tavanomaisessa lämpöputkessa. Lauhduttimessa on käytännössä kolme vaihetta, jotka ovat tulistuksen poisto, lauhtuminen ja alijäähdytys, joista viimeisimmällä pyritään kompensoimaan vuotolämmöstä aiheutuvaa lämpötilan nousua korvauskammiossa. [7]

### 3.2 Pienikokoiset lämpöputket

Elektroniikan jäähdytyksen yhteydessä mini- ja mikro- kokoluokalla tarkoitetaan lämpöputkia, joiden halkaisija on 1 mm–1 cm [6]. Halkaisijan pienen koon ansiosta niitä voidaan soveltaa hyvin pienenä elektroniikassa, jossa myös jäähdytysjärjestelmä pitäisi saada mahtumaan hyvin rajoitettuun tilaan. Käytännössä pienet lämpöputket (MHP) toimivat samalla tavalla kuin tavanomaiset lämpöputket, mutta ne ovat huomattavasti pienempiä, mikä on saatu mahdollistettua mikrokokoisilla kapillaarirakenteilla [6].

Pienellä kapillaarirakenteella saavutetaan suurempi efektiivinen lämmönjohtavuus ja suurempi jäähdytyksessä käytössä oleva pinta-ala suhteessa tilavuusvirtaan [6]. Molemmat ilmenevät ominaisuudet ovat eduksi jäähdytyksessä, sillä fluidilla on enemmän kontaktia lämmönlähteen kanssa, minkä ansiosta lämpöputkessa siirtyvä lämpö kasvaa. Kapillaarirakenteen pieni koko tarkoittaa myös pienempiä huokosia, joiden ansiosta gravitaation negatiivinen vaikutus vähenee.

Hyvänä esimerkkinä voidaan pitää puolijohteiden jäähdytystä, jotka sisältävät usein piitä. Myös MHP:t voidaan valmistaa piistä, joten niiden yhteensovittaminen puolijohteiden kanssa on suhteellisen suoraviivaista. [6] Usein tällaiset jäähdytysmekanismit vaativat kuitenkin vielä toimiakseen lämpönielun tai rivaston, johon puolijohteesta poistettu lämpö voidaan siirtää.

### 3.3 Litteät lämpöputket ja höyrykammiot

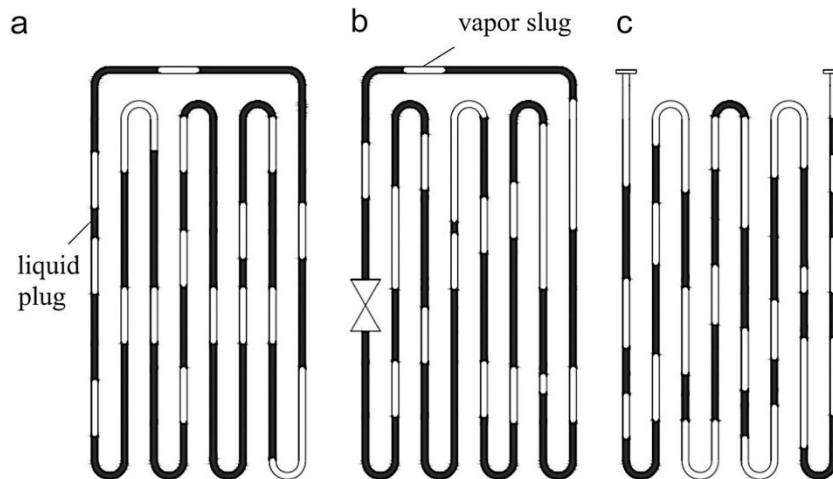
Litteät lämpöputket eli höyrykammiot ovat yksi lämpöputkien tyyppi, jonka avulla elektroniikassa syntyvää lämpöä voidaan siirtää suuremmalle pinta-alalle, koska ne ovat tasomaisia [6]. Tämän ansiosta laitteeseen ei muodostu komponenteille haitallisia tai mahdollisesti tuhoisia kuumia pisteitä. Etuna on myös suuri lauhdutin suhteessa höyrykamion kokonaismittoihin [6]. Höyrykammiot ovat varsin ohuita ja tasomaisia, joten niitä voidaan mahdollisesti hyödyntää myös matkapuhelimissa.

Litteitä lämpöputkia ei tarvitse välttämättä liittää erilliseen rivastoon, josta lämpö siirretäisiin pois pakotetun konvektion avulla. Vaihtoehtoisesti höyrykammioita voidaan käyttää pelkästään lämmön tasaajana, mikä voisi tarkoittaa esimerkiksi puhelimen yhteydessä syntyvän lämmön siirtämistä tasaisesti ulkokuoreen [6]. Puhelinmarkkinoille on kuitenkin tullut puhelimia, joissa on lasinen takakansi. Se rajoittaa luonnollisesti puhelimesta ympäristöön siirtyvää lämpöä, koska lasi johtaa alumiinia huonommin lämpöä.

### 3.4 Oskilloivat lämpöputket

Oskilloivat lämpöputket koostuvat yleensä yhdestä pitkästä putkesta, joka on taitettu monelle mutkalle. Putken sisään imetään tyhjiö ja lisätään työainetta, kunnes saavutetaan haluttu täyttöaste. Kuvassa 4 on esitetty erilaisia oskilloivia lämpöputkia: Putkessa a putken päät ovat suljettu, ja siinä ei ole erillistä venttiiliä kuten putkessa b, jossa venttiili varmistaa fluidin liikkumisen oikeaan suuntaan. Kolmas vaihtoehto on jättää molemmat putken päät auki kuten putkessa c, minkä takia fluidin suljettu kierto putkessa ei tietenkään ole mahdollista. Tyypillisin oskilloivan lämpöputken rakenne on vaihtoehto a. [8]

Putkessa oleviin nestemäisiin tulppiin ja höyrykupliin siirtyy lämpöä höyrystimestä, joka voi sijaita esimerkiksi kuvan 4 lämpöputken alareunassa. Putkeen siirtynyt lämpö saa lisää nestettä höyrystymään, joka kasvattaa höyrykuplien kokoa ja nostaa höyrynpaineita, minkä seurauksena fluidi liikkuu lauhdutinta kohti. Lauhduttimeen päästyään fluidi luovuttaa lämpönsä ja kuplat romahtavat, jolloin putkessa näyttäisi syntyvän värähtelevää liikettä. [8]



**Kuva 4.** Erilaisia oskilloivia lämpöputkia [8].

Oskilloivan lämpöputken etuja ovat muun muassa korkea lämmönsiirtokyky, nopea reaktioaika, pieni koko ja yksinkertainen rakenne. Putkea ei kuitenkaan voida soveltaa kaikkiin kohteisiin, sillä se ei toimi jokaisessa asennossa gravitaatiokentässä. Lisäksi oskilloivan lämpöputken toimintaperiaatetta ei osata selittää yksiselitteisesti ja tarkasti, mikä on innoittanut tiedeyhteisöä tutkimaan esimerkiksi toimintaan vaikuttavia parametreja. [8] Lämmönsiirtokykyä maksimoidessa täytyy huomioida tietenkin fluidin virtaukseen vaikuttavat tekijät ja lämmönsiirtopinta-ala. Tällaisia parametreja voisivat olla esimerkiksi putken halkaisija ja fluidin viskositeetti.

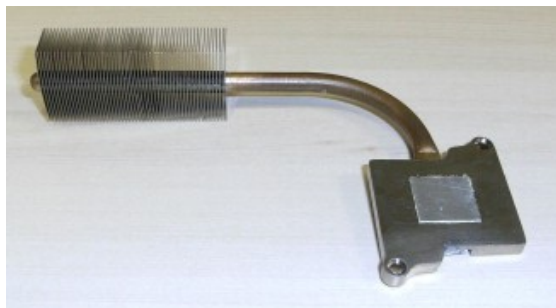
Elektroniikan jäähdytyksen kannalta oskilloivat lämpöputket ovat siis lupaavia. Jos lämpö siirretään jäähdytettävästä kohteesta höyrystimeen johtumalla, lämmönsiirtoa rajoittaa kontaktipinta-ala. Prosessori on esimerkiksi tasomainen, joten kaareva pinta on geometrisesti huono vaihtoehto lämmönsiirtoa maksimoidessa. Lauhduttimessa lämmönsiirtoa voidaan parantaa rivoilla, mutta myös höyrystin vaatii siis vastaavanlaisen ratkaisun toimiakseen optimaalisesti.

## 4. SOVELLUSKOHTEET ELEKTRONIIKAN JÄÄHDYTYKSESSÄ

Erilaisia elektronisia laitteita on paljon, minkä takia jokaiselle laitteelle täytyy luoda oma jäähdytysmenetelmä. Monipuolisuus ja muokattavuus ovat lämpöputkien valttikortteja, mikä mahdollistaa lämpöputkien käytön melkein missä tahansa sovelluskohteessa. Yksinään lämpöputki ei kuitenkaan pysty jäähdyttämään mitään, sillä se vaatii kylmälevyn tai jonkin vastaavan, johon siirretty lämpö voidaan siirtää.

### 4.1 Lämpöputki osana jäähdytysratkaisua

Lämpöputkien tavoitteena on siirtää lämpöä pois kuumenevista komponenteista, mikä tarkoittaa, että lämpöputki on vain yksi osa jäähdytysratkaisua. Esimerkiksi prosessorin jäähdyttäminen voi olla yksinkertaisimmillaan sitä, että siihen liitetään lämpöputki, jonka lauhduttimena toimii rivasto. Lämpö siirtyy prosessorista lämpöputken kautta rivastoon, josta se voidaan siirtää ympäristöön joko luonnollisella tai pakotetulla konvektiolla. Vastaavanlainen jäähdytysmenetelmä on esitetty kuvassa 5. [9]



**Kuva 5.** Lämpöputken käyttö kannettavan tietokoneen jäähdytyksessä [9]

Kuvasta 5 nähdään, että lämpöputken ei välttämättä tarvitse olla suoraan yhteydessä jäähdytettävän kohteen kanssa. Tässä tapauksessa väliin on laitettu hyvin lämpöä johtava levy, johon sekä lämpöputki että prosessori ovat liitettynä, minkä ansiosta lämmönjohtumista ei rajoita vähäinen kontaktipinta-ala. Liitoksissa on toisaalta pienet kontaktivastukset, jotka pienentävät lämpövuota.

Muita sovelluskohteita lämpöputkille ovat esimerkiksi mikrosirut, puhelimet ja älykellot. Esimerkiksi Samsung on ilmoittanut käyttävänsä lämpöputkia puhelimissaan. Heidän insinööriensä mukaan lämpöputkien sisällyttäminen puhelimeen oli hieman haastavaa,

koska puhelimet ovat hyvin ohuita ja lämpöputken kiinnitys saattaa heikentää puhelimen rakennetta. [2] Käytännössä puhelinten ja älykellojen jäähdytykseen voidaan hyödyntää erittäin ohuita lämpöputkia, joiden paksuus on kokoluokkaa 0,4–0,6 mm ja lämmönsiirtoheho on 5 W [10]. Kuvasta 6 voidaan vielä nähdä lämpöputkien sijainteja ja muotoja erilaisissa pienielektroniikan sovelluskohteissa.



**Kuva 6.** Lämpöputkien käyttö pienielektroniikassa [10]

Kuvasta 6 huomataan, että lämpöputket ovat hyvin ohuita ja taipuisia. Niiden sovittaminen ja kiinnittäminen laitteeseen voi siis olla haastavaa, minkä lisäksi ne voivat vahingoittaa kiinnitysprosessissa. Toisaalta juostavuuden ansiosta ohuiden lämpöputkien ja höyrykammioden sovittaminen muiden komponenttien kanssa on vaivattomampaa. Yksittäisten ja pienien mikrosirujen jäähdytys voi olla hankalaa, koska kontaktipinta-alaa on hyvin vähän verrattuna esimerkiksi tietokoneen prosessoriin.

Vapaa konvektio, ilman pakotettu konvektio, nesteen pakotettu konvektio ja nesteen höyrystymiseen perustuva jäähdytys ovat tavanomaisimmat jäähdytysratkaisut. Näistä menetelmistä tehokkaimmin lämpöä poistavat nesteen pakotettu konvektio ja nesteen höyrystymiseen perustuva jäähdytys. [1] Koska lämpöputkissa hyödynnetään nesteen höyrystymistä, on komponenttien jäähdytys perusteltua lämpöputkillä. Muita innovatiivisia jäähdytysmenetelmiä ovat muun muassa faasimuutosmateriaaleihin perustuvat lämmönsiirtomenetelmät ja nanofluideja hyödyntävät nestejäähdytysmenetelmät [1]. Faasimuutosmateriaaleilla ja lämpöputkillä yhteistä on ylimääräisen energian käyttäminen faasimuutokseen, kun taas nanofluideja voidaan hyödyntää mahdollisesti sellaisenaan lämpöputkissa.

Faasimuutosmateriaaleissa ideana on käyttää poistettava lämpöä faasimuutokseen, mikä mahdollistaisi lämmön uudelleenkäytön esimerkiksi talojen lämmityksessä [1]. Vaikka molemmissa sekä lämpöputkissa että faasimuutosmateriaaleissa lämpöä hyödynnetään faasimuutokseen, ne eivät kuitenkaan ole toiminnallisesti samalla tavalla käytettäviä. Kuten aikaisemmin jo mainittiin, faasimuutosmateriaaleissa tarkoituksena on käyttää lämpöä uudelleen, jolloin materiaali toimii lämpövarastona. Lämpöputkilla pyritään puolestaan siirtämään lämpö pois komponenteista.

Tavallaan nämä ratkaisut voidaan siis yhdistää, jolloin komponentista poistettava lämpö siirretään lämpöputkea pitkin faasimuutosmateriaaliin, johon se varastoitaisi myöhempää käyttöä varten. Mikäli jäähdytettävässä järjestelmässä on esimerkiksi lisäksi hydraulikkaa tai sähkömoottori, mahdollinen sovelluskohde tällaiselle lämpöputki-faasimuutosmateriaali-järjestelmällä voisi olla hydraulikkaneesten tai moottoriöljyn lämmitys. Varastoidulla lämmöllä voitaisiin esimerkiksi lämmittää ja samalla notkistaa hydraulikkaneeste tai moottoriöljy kylmäkäynnistyksen yhteydessä.

Jäähdytysjärjestelmät ovat pienimmille komponenteille liian massiivisia, joten niiden integroiminen keskenään on luonnollisesti haastavaa. Toisaalta pienet lämpöputket eivät välttämättä ole toiminnallisesti tarpeeksi tehokkaita lämmönsiirtämisessä tai pieni koko aiheuttaa ongelmia fluidin virtauksessa. Lämmönsiirto-ominaisuuksia voidaan kuitenkin tehostaa nanofluideilla, jotka ovat lupaavia ratkaistaessa edellä mainittuja ongelmia. Nanofluidit eroavat tavallisista jäähdytysnesteistä siten, että niihin on lisätty pieniä, yleensä metallisia, partikkeleita. [11]

Nanofluidien käytön on havaittu tehostavan efektiivistä lämmönjohtavuutta erilaisissa lämpöputkissa [11, 12]. Huomattavaa on kuitenkin, että suurempi partikkelikoko ei tuonut suurta parannusta lämmönsiirto-ominaisuuksiin, vaan merkittävämpi tekijä oli konsentraatio [11]. Oskilloivassa lämpöputkessa liian suuren konsentraation havaittiin toisaalta olevan haitaksi. Teoriassa suurempi konsentraatio parantaa lämpöputken efektiivistä lämmönjohtumiskerrointa, mutta toisaalta myös nesteen viskositeetti kasvaa, mikä puolestaan haittaa höyrykuplien syntymistä ja heikentää siten systeemin tehokkuutta. [12]

## 4.2 Lämpöputken suunnittelu- ja valmistusprosessi

Sovelluskohteen asettamat vaatimukset jäähdytykselle toimivat lähtökohtana lämpöputken suunnittelulle. Ensimmäisenä rajoittavana tekijänä toimii tila, sillä esimerkiksi litteitä lämpöputkia ei voi välttämättä käyttää kontaktipinnan vähäisyyden takia, optimaalisessa

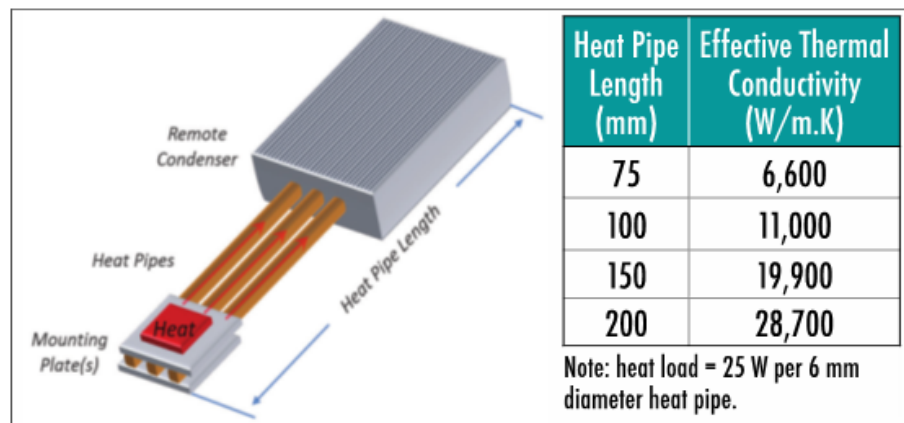
tilanteessa koko jäähdytettävä kohde peitetään lämpöputkilla. Toiseksi tulee pohtia työfluidin kiertoa, eli miten painovoima ja kapillaarinen rakenne toimivat yhdessä mahdollistaakseen lämpöputken toiminnan. Kapillaarista rakennetta voidaan muokata halutuksi muuttamalla esimerkiksi sen paksuutta tai huokoisten kokoa. [6,13]

Käytännössä edellä mainittuja parametreja muuttamalla voidaan säätää kapillaarista painetta suuremmaksi tai pienemmäksi lämpövuon suuruuden mukaan. Esimerkiksi oskiloivat lämpöputket eivät välttämättä toimi kaikissa asennoissa gravitaatiokentässä, kun taas silmukkalämpöputket toimivat lähes missä asennossa tahansa. Kolmanneksi valitaan siis lämpöputken tyyppi ja sen tehtävä. [6, 13] Esimerkiksi matkapuhelimissa ei välttämättä tarvitse siirtää lämpöä ympäröivään ilmaan pakotetulla konvektiolla, jos lämmön jakaminen suuremmalle alueelle litteällä lämpöputkella tai höyrykammiolla riittää.

Tyypillisesti lämpöputkien efektiivinen lämmönjohtavuus on noin 250–500ertainen verrattuna kupariin tai alumiiniin, mutta se vaihtelee suuresti muun muassa lämpöputken pituuden, lämpötehon, sekä höyrystimen että lauhduttimen koon funktiona. Esimerkiksi kuvan 7 mukaisessa testilaitteistossa lämpöä johdetaan pois 75 W teholähteestä kolmella lämpöputkella ja tutkittiin efektiivistä lämmönjohtavuutta lämpöputken pituuden funktiona. [13] Huomattavaa on efektiivisen lämmönjohtavuuden kasvaminen pituuden kasvaessa kaavan 1 mukaisesti:

$$K_{eff} = \frac{QL_{eff}}{A\Delta T}, \quad (1)$$

jossa  $Q$  on siirretty lämpöteho,  $K_{eff}$  on efektiivinen lämmönjohtavuus,  $A$  on poikkipinta-ala,  $\Delta T$  on lämpötilaero höyrystimen ja lauhduttimen välillä ja  $L_{eff}$  on lämpöputken karakteristinen pituus.



**Kuva 7.** Lämpöputken pituuden vaikutus efektiiviseen lämmönjohtavuuteen [13].

Litistäminen ja taivuttaminen vaikuttavat haitallisesti lämpöputkien toimintaan, mutta ne ovat useasti pakollisia toimenpiteitä, kun tilaa jäähdytysjärjestelmälle on rajoitetusti. Yleinen käsitys on, että lämpöputkia voidaan litistää 30 %–60 % alkuperäisistä mitoistaan, mutta esimerkiksi höyrykammioita litistetään 90 %. Käytännössä litistämisen vaikutus riippuu alkutilasta, eli kuinka paljon höyryllä on tilaa ennen litistämistä. [13] Huomioon tulee tietysti ottaa myös rakenteen kestävyys, sillä ongelmaksi voi ilmaantua vaipan halkeaminen tai rakenteen romahtaminen.

Lämpöputken taivuttamisen vaikutus maksimaaliseen lämmönsiirtotehoon voidaan arvioida. Tiedetään, että jokainen 45 asteen taivutus vähentää siirrettävää maksimilämpötehoa noin 2,5 %. Lisäksi minimitaivutussäde on yleensä 3 kertaa lämpöputken halkaisija. Ohjeet ovat vain suuntaa-antavia, joten yleensä käytetään myös 30 %:n suuruista termistä turvamarginaalia, jonka suuruus lasketaan siirrettävästä lämpötehosta. [14]

Kun tiedetään edellä mainitut perustiedot, voidaan suunnitella lämpöputkessa käytettävät materiaalit ja rakenne. Vaikka monilla eri rakennegeometrioilla voidaan päästä samaan lopputulokseen, ratkaisevaksi tekijäksi voi nousta esimerkiksi ohuempi profiili. Jos puhelinvalmistajalla on esimerkiksi mahdollisuus käyttää kolmea pyöreää lämpöputkea tai kahta litteää, litteät voivat olla parempi vaihtoehto, vaikka kolmella lämpöputkella lauhduttimen tehokkuus on parempi. Lauhduttimen valinnalla voidaan vaikuttaa merkittävästi jäähdytysjärjestelmän toimintaan, koska lämmönlähdettä ei voi tietenkään muuttaa. Lopuksi tarkistetaan vielä toimintaperiaate ja lämmönsiirtoprosessi. [6, 13]

Esimerkiksi Samsung Galaxy S7 ja S7 edge -puhelimet sisältävät lämpöputket. Samsungin insinöörien mukaan lämpöputkien sisällyttäminen kehitystyöhön onnistui, koska ohjelmisto ja komponentit muuttuvat kehitystyön aikana. Lisäksi Galaxy S7 ja S7 edge -puhelimien suunnittelun lähtökohtana oli jäähdytyksen optimointi, mikä ilmeni lämpöputkien lisäksi ohjelmoinnissa: algoritmit pyrittiin optimoimaan siten, ettei ylimääräistä lämpöä synny komponenteissa. [2]

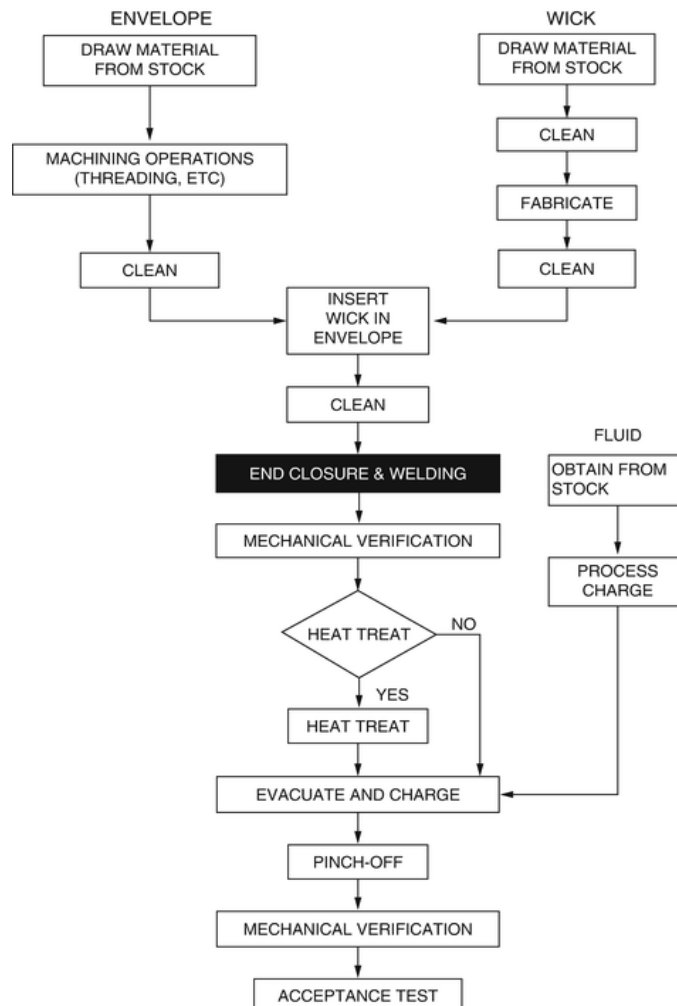
Seuraavaksi lämpöputken rakenne suunnitellaan, minkä jälkeen toimintaa tarkastellaan esimerkiksi mallintamalla. Mallinnuksesta saatavan datan avulla voidaan huomata merkittävät poikkeamat toiminnassa. Jos kaikki toimii odotetulla tasolla, lopulta lämpöputkea testataan ennen sen käyttöönottoa.

Lämpöputkien terminen suorituskyky perustuu lopulta kolmeen asiaan: toiminnallisuuteen, juostavuuteen ja luotettavuuteen [6]. Lämpöputken on toimittava luotettavasti, jotta



komponentit eivät tuhoudu. Lisäksi toiminnan on oltava joustavaa, sillä lämpötilaero höyrystimen ja lauhduttimen välillä ei todennäköisesti pysy vakiona, mikä ei saa aiheuttaa jäähdytysprosessin pysähtymistä.

Suunnitteluprosessin jälkeen lämpöputki valmistetaan. Esimerkiksi tavanomaisen lämpöputken valmistuksessa on otettava huomioon monta asiaa, kuten työfluidin lisäys, vuotojen ja paineensietokyvyn tarkastaminen ja ennen kaikkea materiaalien puhdistaminen. Puhdistaminen tehdään pääsääntöisesti likaisten työvaiheiden jälkeen. Jos materiaalit ovat likaisia, lämpöputken sisään pääsee toiminnalle haitallisia aineita, jotka estävät kapillaarisen rakenteen kostumisen tai heikentävät kapillaarisia voimia. Ongelmaksi saattaa nousta myös hitsausseamien repeäminen, jonka ansiosta työfluidi saattaa valua ulos lämpöputkesta. [15, 16] Koko valmistusprosessin (kuva 8) ajan mukana kulkee siis laadunvalvonta.



**Kuva 8.** Lämpöputkien valmistusprosessi [17]

Prosessi alkaa kuvan 8 mukaisesti lämpöputken ja kapillaarisen rakenteen puhdistuksesta. Kuten aikaisemmassa kappaleessa mainittiin, materiaalien huolellinen puhdistaminen on tärkeää. Valmistajilla ei kuitenkaan ole yhteistä standardia, joka määrittäisi tarkat raja-arvot. [16, 17] Standardeille ei kuitenkaan ole välttämättä tarvetta, koska materiaaleja on huomattava määrä ja kehitystyön tuloksena löydetään todennäköisesti vielä lisää valmistukseen soveltuvia materiaaleja. Lisäksi puhdistukseen käytettäviä menetelmiä on paljon.

Pääsääntöisesti materiaalit saadaan puhtaaksi upottamalla ne pesunesteeseen tai käyttämällä ultraääntä [15 - 17]. Erityisesti metallien puhdistamiseen liittyy olennaisesti kaasunpoisto, joka toteutetaan altistamalla materiaalit tyhjiölle. Tavoitteena on estää ylimääräisten kaasujen kerääntyminen höyrylle suunniteltuun tilaan. [15] Puhtauden määrittäminen on siis vaikeaa, sillä toiset materiaalit kestävät enemmän epäpuhtauksia kuin toiset ja puhdistusmenetelmien välinen tehokkuus vaihtelee.

Kun sekä vaippa että kapillaarinen rakenne on puhdistettu, ne liitetään toisiinsa mieluiten välittömästi. Näin estetään materiaalien uudelleen likaantuminen. Kapillaarisen rakenteen sisällyttäminen vaippaan on tehtävä huolellisesti, jottei rakenne vahingoitu prosessissa. Seuraavana hitsataan täyttöpilli kiinni päätykanteen, joka puolestaan hitsataan lämpöputkeen kiinni. Hitsaus on riskialtis prosessivaihe, koska sen epäonnistuessa työfluidilla on poistumisreitti lämpöputkesta. [16, 17] Vuotojen havaitseminen merkitsee siis paljon lämpöputken toiminnan kannalta ja onkin olennainen osa valmistusprosessia.

Kuvan 8 mukaisesti seuraava vaihe lämpöputken kokoamisessa on tyhjiön imeminen ja työfluidin lisääminen, mikäli lämpökäsittelyä ei vaadita. Tässä vaiheessa tyhjiön luominen tapahtuu korkeimmassa mahdollisessa lämpötilassa, jotta saasteet saadaan myös pois materiaalin pinnalta. [17] Prosessiin käytetty aika riippuu luonnollisesti lämpöputken rakenteesta, käytetyistä materiaaleista ja käytetyistä puhdistusmenetelmistä. Kun tyhjiö on luoto, lämpöputkea operoidaan vielä työfluidilla puhdistusmielessä. Lopuksi puhdistuksessa käytetty työfluidi poistetaan, imetään tyhjiö, lisätään lopullisesti käytettävä työfluidi ja suljetaan lämpöputki. [17]

## 5. HYÖDYT JA HAASTEET

Edellisessä luvussa tarkasteltiin lämpöputkien suunnittelu- ja valmistusprosessin vaiheita ja niiden työläyttä. Tässä luvussa on tarkoituksena selvittää ja pohtia lämpöputkien hyötyjä sekä rajoituksia, jotta saadaan käsitys, mitä lämpöputkien käytöllä voidaan saavuttaa ja ovatko suunnittelu- ja valmistustyöllä saatavat edut merkittäviä.

### 5.1 Hyödyt ja edut

Lämpöputkilla on monia hyötyjä, joista merkitsevin on varmaankin suuri efektiivinen lämmönjohtavuus verrattuna tavalliseen kupariin [13]. Kuparin tai muun lämmönjohtimen sijasta voidaan käyttää lämpöputkia, minkä ansiosta laitteet voidaan suunnitella pienemmäksi kooltaan. Lämpöputket vaikuttaisivat siis pystyvän vastaamaan pienenevän elektroniikan asettamille vaatimuksille.

Toinen merkittävä etu on mahdollisuus toteuttaa passiivinen jäähdytys, joka tarkoittaa käytännössä sitä, että liikkuvia osia ei tarvita [1]. Käytännössä ei siis tarvita pumppua nesteen kiertoa varten. Passiivisen toiminnan ansiosta ei myöskään ole mekaanisia osia, jotka voivat rikkoutua, minkä takia laitteen toimintavarmuus on hyvä ja laitteen omistaja säästää todennäköisesti kuluissa.

Lämpöputket ovat myös hiljaisia, sillä niissä ei ole liikkuvia osia pitämässä ääntä [1]. Kuluttajille tämä on suuri etu, koska käyttämämme elektroniikan hiljaisuutta vaikutetaan arvostavan. Jos esimerkiksi kaiuttimien jäähdytys toteutetaan asettamalla sen sisälle pieni tuuletin, syntyvä ääni häiritsee ainakin analyttistä kuuntelemista. Parempi ratkaisu voisi siis olla johtaa komponenteissa syntyvä lämpö kaiuttimien ulkokuoressa olevaan rivastoon käyttämällä lämpöputkia.

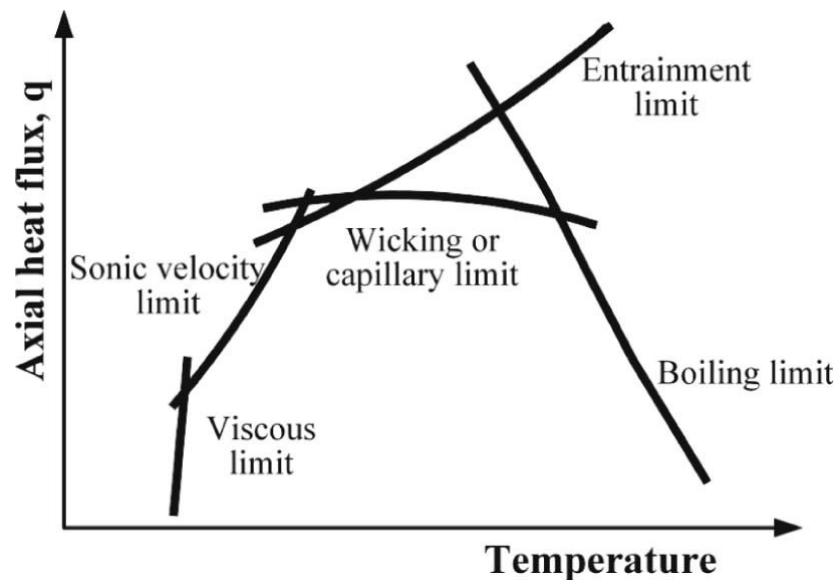
Tapauksissa, joissa lämmönlähde ei ole lähellä laitteen ulkokuorta tai lämpöä ei voida johtaa suoraan ulos, vaaditaan lämpöputkilta taipuisaa rakennetta. Muokattavuus onkin yksi lämpöputkien eduista. [1] Taivuttaminen ja litistäminen aiheuttaa tietysti omat haasteensa, joista selitettiin luvussa 4. Tietysti käyttämällä silmukkalämpöputkia voidaan lämpö johtaa pienemmillä häviöillä ulos laitteesta, koska kuten luvussa 3 selitettiin: silmukkalämpöputkissa olevissa höyry- ja nesteputkissa ei ole kapillaarirakennetta haittaamassa virtausta.

Varsinkin arkikäytössä oleva pienenälektroniikka, kuten puhelimet, älykellot ja -sormukset, liikkuvat ja pyörivät eri asentoihin suhteessa painovoimaan [1]. Silmukkalämpöputkille tämä ei kuitenkaan ole ongelma, jos liike ja pyöriminen on otettu huomioon suunnittelu- vaiheessa. Lämpöputkia on käytetty myös avaruudessa. Toimintaolosuhteiden ei siis tarvitse olla ideaaliset lämpöputkien käytölle ja jäähdytykseenkään ei tietenkään vaadita systeemin ulkopuolista energiaa. [1, 5, 10]

Viimeisenä merkittävänä etuna on mahdollisuus käyttää lämpöputkia muiden innovaatioiden kanssa kuten luvussa 4.1 mainittiin. Merkittävä tutkimuskohde voisi olla lämpöputkien käyttö älyvaatteissa hyödyntäen Seebeckin ilmiötä, jossa lämpötilaero aiheuttaa jännitteen kahden materiaalin välille. Älyvaatteissa lämpöputkien tulisi tietenkin olla ohuita, kevyitä ja kestäviä, jotta niiden käyttöä voitaisiin harkita vakavasti.

## 5.2 Haasteet ja rajoitukset

Pääasiassa lämpöputkien toimintaa dominoi lämpöputken tyyppi, työfluidi ja kapillaarinen rakenne, joiden valinnasta selitettiin luvussa 4. Yhteistä eri sovelluksille ja tyypeille on taustalla oleva ilmiö ja ennen kaikkea siihen liittyvät rajoitukset, joista kerrotaan tässä luvussa. Lämpöputkien toimintaa rajoittaa pääasiassa 5 asiaa, jotka ovat esitettynä kuvassa 9. Kuvasta nähdään, että toimintaa rajoittaa viskositeetti, äänennopeus, kiehuminen, nesteen kulkeutuminen höyryn mukana ja kapillaariset voimat. [3, 6]



**Kuva 9.** Lämpöputken toimintaa rajoittavat tekijät [6]

Viskositeetin haitallinen vaikutus ilmenee toimittaessa alhaisissa lämpötiloissa. Pieni lämpötilaero aiheuttaa pienen paine-eron höyrystimen ja lauhduttimen välille, minkä takia viskoosiset voimat ovat merkittäviä ja pahimmillaan estävät höyryn liikkumisen höyrystimestä lauhduttimeen. Höyrystimen ja lauhduttimen välinen paine-eron tulee siis olla riittävän suuri, jottei viskoosiset voimat dominoivat. Elektroniikan jäähdytyksen kannalta tämä ei ole suuri ongelma, koska yleensä komponentit kuumenevat paljon, jolloin paineero nousee riittävän suureksi. [3, 6]

Lämpötilan noustessa höyryn nopeus kasvaa, mutta nopeuden raja-arvona toimii äänennopeus. Suurin nopeus ilmenee lämpöputken toiminnan alkaessa, jolloin tämä raja-arvo on mahdollista saavuttaa. [6] Lauhduttimessa on alempi paine ja lämpötila, joka aiheuttaa lämpötilan laskun höyrystimessä, kunnes äänennopeuden asettama rajoite tulee vastaan. Tilanteella on siis paljon yhtäläisyyksiä suutinvirtauksien kanssa. [3]

Kolmas ja ehkä samalla merkittävin toimintaa rajoittava tekijä on kapillaarirajoite. Fluidin kierron toisesta puolesta huolehtii kapillaarirakenne, jonka aiheuttama kapillaaripaine siirtää nesteen takaisin höyrystimeen. Jos paine on liian pieni ja nestettä ei siirry vaaditusti, höyrystin kuivuu ja nesteen kiertäminen pysähtyy. Toisin sanoen lämpöputki lakkaa toimimasta. [3] Luonnollisesti tämä on haitallista, koska komponentin lämpötila nousee ja pahimmillaan elektroniikka syttyy palamaan.

Kuten jo aikaisemmin tässä luvussa todettiin, voi höyryn nopeudet olla hyvinkin suuria. Tällöin on mahdollista, että höyryn mukana kulkee nestepisaroita, mikä rajoittaa lämpöputken toimintaa (kuvassa 9 nimellä entrainment limit). Pisaroiden kulkeutuminen aiheuttaa pahimmillaan kuivumisen. [3, 6] Elektroniikassa käytetyt lämpöputket ovat hyvin pieniä, joten myös tarvittavan nesteen määrä pyritään minimoimaan, joten nestettä ei välttämättä riitä enää toimintaan, jos sitä kulkeutuu höyryn mukana pois. Samalla tietysti menetetään faasimuutokseen vaadittava energiamäärä kyseisiltä pisaroilta, joten toimintakaan ei ole enää parhaalla mahdollisella tasolla.

Korkeilla radiaalisilla lämpövuon arvoilla saattaa tulla vastaan kiehumisrajoite. Tällöin on kyse siitä, että kapillaarirakenteessa esiintyy kuplakiehumista, jonka takia kapillaarirakenteessa oleva neste kiehuu pois ja kuivuu [3, 6]. Eräs ongelma on niin kutsuttu flooding-ilmiö. Ilmiössä höyrystimen paine on hyvin suuri, minkä takia neste ei pääse höyrystimeen ja höyryn lämpötila nousee. Lopulta nesteen hydrostaattinen paine on tarpeeksi suuri ja neste pääsee virtaamaan höyrystimeen, mistä takia myös höyryn lämpötila laskee. Ilmiölle on ominaista höyryn lämpötilan ja paineen muuttuminen vaihtelevasti. [18]

Muut haasteet liittyvät esimerkiksi lämpöputken integroimiseen osaksi jäähdytysjärjestelmää ja koko systeemin sisällyttäminen elektroniseen laitteeseen, suunnittelun ja valmistuksen haastavuus sekä lämpöputken rikkoutuminen. Luvussa 4 selitettiin valmistuksesta ja suunnittelusta, jotka ovat siis työläitä ja aikaa vieviä prosesseja. Tarvittava tutkimus ja muu taustatyö tuo luonnollisesti lisää hintaa lämpöputkille verrattuna tavanomaisiin jäähdytysmenetelmiin.

Lisäksi ongelmaksi saattaa muodostua lämpöputken mekaaninen kestävyys verrattuna esimerkiksi kuparijohtimeen. Kuparijohtimet ovat hyvin taipuisia ja kohtuullisen kestäviä riippuen tietysti muun muassa johtimen pituudesta sekä poikkipinta-alasta. Lämpöputki on taas hauraampi, joten isku vaippaan voi pahimmillaan saattaa lämpöputken ja laitteen epäkuntoon. Luvussa 2 selitettiin lämpöputken komponenttien välisestä yhteensopivuudesta materiaalien kannalta. Mutta myös elektronisen laitteen ja lämpöputken täytyy sopia yhteen. Jos esimerkiksi työneste vuotaa elektronisen laitteen sisällä, jäähdytettävä kohde saattaa tietenkin tuhoutua kuumuudesta. Tärkeää olisi lisäksi tietysti tutkia työfluidin vuodon aiheuttamia haittavaikutuksia muille laitteen komponenteille.

## 6. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT JA TUTKIMUS

Tulevaisuudessa elektronisten komponenttien koko todennäköisesti pienenee entisestään. Ylikuumeneminen haastaa siis jatkossakin tutkijoita ja laitevalmistajia. Jotta lämpöputket pystyvät vastaamaan tähän ongelmaan, tulee niiden kehittyä vielä entisestään. Lisäksi tarvitaan tutkimusta parametrien vaikutuksista toimintaan, varsinkin puhuttaessa oskilloivista lämpöputkista, joiden toiminta ei ole vielä täysin selitettävissä [8]. Vaikuttaisi siltä, että pääasiassa pyritään pienentämään lämpöputkien kokoa sekä etsimään uusia materiaaleja.

Laitekokojen pienentyessä myös lämpöputkien on pienennettävä luonnollisesti. Tavanomaiset lämpöputket ovat liian suuria ja ne eivät yksinkertaisesti ole dimensioiltaan sopivia, minkä takia on tutkittu mahdollisuutta tehdä äärimmäisen ohuita lämpöputkia. Nämä lämpöputket olisivat käytännössä tavanomaisia lämpöputkia, jotka litistetään tai hyvin ohuita höyrykammioita. [10] Tällaiset lämpöputket sisältävät luonnollisesti mikrokoluokan kapillaarisen rakenteen, joten myös kapillaariset voivat ovat suuremmat [6].

Toinen merkittävä tutkimuskohde on uudet materiaalit. On tutkittu, että lämpöputkia voitaisiin valmistaa polymeeristä, josta rakennetut lämpöputket ovat joustavia ja kevyitä. Valmis lämpöputki olisi ohut, luokkaa 1 mm paksuudeltaan, eli käytännössä se olisi joustava kalvo. Myös pii on lupaava materiaali, sillä se on muun muassa kevyempää kuin metalli ja yhteensovittaminen piistä valmistettujen puolijohteiden kanssa on vaivatonta. [6, 10] Kolmas potentiaalinen valmistusmateriaali on hiilinanoputki, jonka avulla voitaisiin siirtyä potentiaalisesti mikrokokoisista lämpöputkista nanokokoisiin. [6]

Lämpöputkien rakenne kehittyy, mikä on huomattavissa esimerkiksi vertailemalla silmukkalämpöputkia ja tavanomaisia lämpöputkia keskenään: kapillaarirakenne ei ole enää yhteydessä höyry- tai nesteputkiin. Siirryttäessä nanoluokkaan lämpöputkien rakenne ja valmistusmenetelmät tulevat todennäköisesti muuttumaan radikaalisti, mutta muutoksella luodaan pohjaa uusille työfluideille kuten nanofluideille. [6]

Tulevaisuudessa lämpöputket voidaan mahdollisesti valmistaa 3D-tulostimilla [15]. Käytännössä tämä tarkoittaisi mahdollisuutta suunnitella lämpöputki ja simuloida sen toiminta kokonaan tietokoneella. Suunnittelu ja simulointi olisivat huomattavasti tarkempia, koska kapillaarisen rakenteen kiinnittämisestä aiheutuva epätarkkuus poistuu yhtälöstä.

Valmistusmenetelmä on lupaava, mutta haasteena on muun muassa sintratun kapillaarirakenteen valmistuksessa [15]. Esimerkiksi äärimmäisen ohuiden lämpöputkien valmistukseen tarvitaan uusia menetelmiä, koska yleisesti käytetty litistäminen voi heikentää vaippaa [10].

Lisäksi kapillaarirakennetta tulisi kehittää, jotta hydrofiilisyyks paranee, mikä voidaan saavuttaa muun muassa kemiallisella korroosiolla. Metalleilla on sileän pinnan takia huonot hydrofiiliset ominaisuudet, mutta ne ovat silti yleisin valmistusmateriaali. [10] Metallien hydrofiilisten ominaisuuksia parantamalla voitaisiin siis huomattavasti tehostaa lämpöputkien toimintaa. Äärimmäisen ohuiden lämpöputkien sisärakennetta kehittämällä voidaan myös parantaa lämpöputkien tehokkuutta. On huomattu, että litistämisen takia tilavuus vaihtelee höyry- ja nestekanavissa, mikä heikentää lämmönsiirtoprosessia. Ongelmaan voidaan puuttua optimoimalla sisärakenne, jottei litistäminen vaikuttaisi yhtä merkittävästi prosessiin. [10]

Muita haasteita ilmenee muun muassa muokattavuudessa. Tavoitteena olisi valmistaa erittäin ohut lämpöputki metallisella vaipalla polymeerisen sijasta, koska metalleilla on suurempi lämmönjohtavuus. Lisäksi metallisia kapillaarirakenteita ei voida sintrata polymeeristä valmistettuun vaippaan. Kehitystyön onnistuessa muun muassa puettavan elektroniikan ja taittuvien näyttöjen jäähdytysmenetelmät kehittyvät. [10] Esimerkiksi Samsung on jo tuonut Galaxy Fold -puhelimien markkinoille, jossa on taittuva näyttö, mikä tarkoittaa kehitykselle olevan tarvetta.

Loppujen lopuksi lämpöputkien mahdollisuus ratkaista pienten elektronisten komponenttien jäähdytys vaikuttaa lupaavalta. Lisäksi hieman isompien laitteiden jäähdytystä voidaan todennäköisesti tehostaa entisestään käyttämällä lämpöputkia. Esimerkiksi rivas-ton yksittäisten ripojen korvaaminen vastaavan muotoisilla lämpöputkillla voisi olla mahdollinen tutkimuskohde. Näin ollen lämpöputkien toimintaa voisi tarkastella myös ripateorian avulla. Muitakin passiivisia jäähdytysmenetelmiä voitaisiin varmasti tehostaa entisestään.



## 7. YHTEENVETO

Elektronisten komponenttien suuret lämpövuot ovat haastaneet valmistajia, tutkijoita ja suunnittelijoita. Komponenttien ja laitteiden pienentyessä myös jäähdytykseltä vaaditaan enemmän, sillä sen toteutukselle on vähän tilaa. Lämpötilan noustessa liian suureksi syntyy kuumia pisteitä ja alueita, jotka voivat pahimmillaan tuhota komponentin ja keskeyttää laitteen toiminnan. Lämpöputket ovat osoittaneet potentiaalia tämän ongelman ratkaisemisessa.

Potentiaali ilmenee lämpöputkien tehokkaalla ja varmatoimisella tavalla siirtää lämpöä pois jäähdytettävästä kohteesta. Lämmönsiirtämiseen ei vaadita ulkoista energiaa tai liikkuvia osia, vaan toiminta perustuu työfluidin faasimuutosenergian hyödyntämiseen, paine-eroihin ja kapillaarirakenteen aiheuttamaan kapillaariseen paineeseen. Nämä tekijät yhdistävät myös monia lämpöputkien tyyppejä.

Jäähdytettäviä laitteita ja komponentteja on monenlaisia, joten myöskin lämpöputkia on paljon erilaisia, joista lupaavia ovat esimerkiksi LHP:t ja oskilloivat lämpöputket. Tulevaisuudessa voidaan myös varmastikin nähdä hyvin tehokkaita mikrokokoisia lämpöputkia, joilla on erittäin hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet. Sovelluskohteita on siis runsaasti: prosessorit, älykellot, -vaatteet sekä puhelimet. Lämpöputkien integroiminen laitteeseen on sekä haastavaa että työlästä, sillä suunnittelu ja valmistusprosessi vaatii huolellisuutta ja pitkäjänteisyyttä. Huono materiaalien puhdistus voi esimerkiksi johtaa pahimmillaan lämpöputken toiminnan pysähtymiseen.

Toisaalta jatkuva suunnittelutyö tarkoittaa myös jatkuvaa optimointia, eli kehitystyö jatkuu ja tulevaisuudessa voidaan nähdä mahdollisesti muiden teknologioiden yhteensovittaminen lämpöputkien kanssa. Lisäksi lämpöputkille tyypilliset edut kuten hiljaisuus, hyvä efektiivinen lämmönjohtavuus, passiivinen jäähdytys ja luotettava toiminta säilyttävät jatkossakin painoarvonsa. Kehitys- ja tutkimustyöllä pystytään myös vaikuttamaan toimintaa rajoittaviin tekijöihin kuten kapillaarirajoitteeseen.

Tulevaisuudessa voidaan nähdä lisäksi uusia materiaaleja, valmistustekniikoita ja mahdollisesti kokonaan uusia lämpöputkityyppejä. Uusien innovaatioiden tuominen markkinoille vaatii kuitenkin rahoitusta ja massatuotantoa. Kaiken kaikkiaan lämpöputkien tulevaisuus vaikuttaa hyvin valoisalta ja ennen kaikkea lupaavalta.

# LÄHTEET

- [1] Sohail Murshed SM, Nieto de Castro, C. A. A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 78, pp. 821–833.
- [2] Samsung Newsroom, [Faces of Innovation: Galaxy S7 & S7 edge] How We Created the Cooling System in the Galaxy S7 and S7 edge, 2016. Saatavissa (viitattu 10.4.2019): <https://news.samsung.com/global/faces-of-innovation-galaxy-s7-s7-edge-how-we-created-the-cooling-system-in-the-galaxy-s7-and-s7-edge>
- [3] Dunn, P. D., and David A. Reay, Heat Pipes, in: *Handbook of Heat Transfer*. 1. ed. ed. Oxford [u.a.]: Pergamon Press, 1976.
- [4] Celsia, Heat Pipe & Vapor Chamber Technology Overview. Saatavissa (viitattu 1.4.2019): <https://celsiainc.com/heat-pipe-and-vapor-chamber-technology-overview/>
- [5] Maydanik YF. Loop heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 2005, Vol. 25, pp. 635–657.
- [6] Chen X, Ye H, Fan X, Ren T, Zhang G, A review of small heat pipes for electronics, *Applied Thermal Engineering*, 2016, Vol. 96, pp. 1–17.
- [7] Launay S, Sartre V, Bonjour J. Parametric analysis of loop heat pipe operation: a literature review, *International Journal of Thermal Sciences*, 2007, Vol. 46, pp. 621–636.
- [8] Bastakoti D, Zhang H, Li F, Li D, Cai W. An overview on the developing trend of pulsating heat pipe and its performance, *Applied Thermal Engineering*, 2018, Vol. 141, pp. 305–332.
- [9] Reay DA, Kew PA, McGlen RJ. Chapter 8 - Cooling of electronic components, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.

- [10] Tang H, Tang K, Tang Y, Wan Z, Li Y, Li J, et al, Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling, *Applied Energy*, 2018, Vol. 223, pp. 383–400.
- [11] Kang S, Wei W, Tsai S, Huang C., Experimental investigation of nanofluids on sintered heat pipe thermal performance, *Applied Thermal Engineering*, 2009, Vol. 29, pp. 973–979.
- [12] Lin Y, Kang S, Chen H., Effect of silver nano-fluid on pulsating heat pipe thermal performance, *Applied Thermal Engineering*, 2008, Vol. 28, pp. 1312–1317.
- [13] George Meyer, Design Considerations When Using Heat Pipes, 2016, Saatavissa (viitattu 29.5.2019): <https://www.electronics-cooling.com/2016/08/design-considerations-when-using-heat-pipes/>
- [14] How Does Bending Affect Heat Pipe & Vapor Chamber Performance, Saatavissa (viitattu 29.5.2019): <https://celsiainc.com/blog-how-does-bending-affect-heat-pipe-vapor-chamber-performance/>
- [15] Reay DA, Kew PA, McGlen RJ., Chapter 5 - Heat pipe manufacture and testing. *Heat Pipes (Sixth Edition)*, 2014, pp. 105–133.
- [16] Zohuri B. Heat Pipe Manufacturing. In: Zohuri B, editor. *Heat Pipe Design and Technology: Modern Applications for Practical Thermal Management* Cham, Springer International Publishing, 2016, pp. 395–430.
- [17] Edelstein, F., & Haslett, R., Heat pipe manufacturing study, Final Report prepared by Grumman Aerospace Corp. for NASA, 1974, Contract No. NASS5-23156
- [18] Chang Y, Cheng C, Wang J, Chen S., Heat pipe for cooling of electronic equipment, *Energy Conversion and Management* 2008, Vol. 49, pp. 3398–3404.